

# Réunion de service 14/12/15

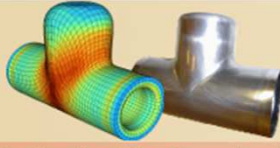
C.Hennuyer



Wallonie

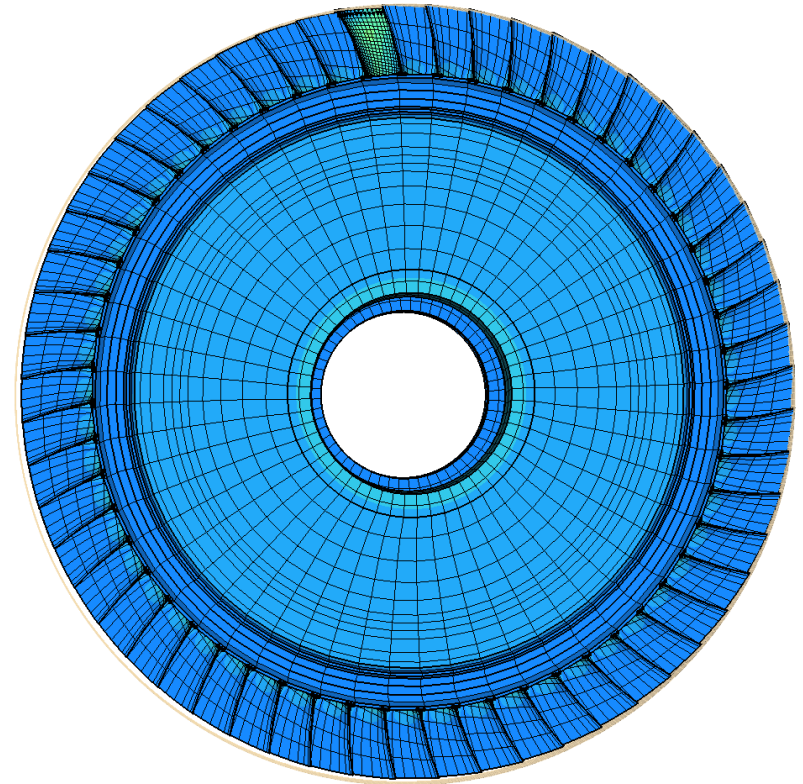


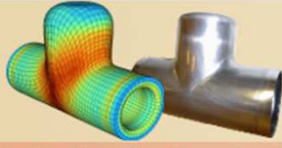
Service public  
de Wallonie



## Plan

- Introduction
- Méthodes de réduction de modèle
  - Super-élément de Guyan
  - Super-élément de Craig-Bampton
  - Modes de déformations
- Implémentation dans Metafor et validation
- Application au modèle du banc Onera
- Application au modèle du banc 18ER
- Conclusions - Perspectives





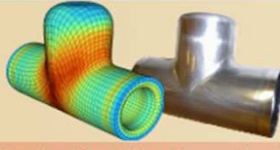
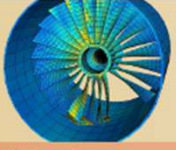
## Introduction

### ■ Contexte :

- ❑ Amélioration du rendement des moteurs d'avion
  - diminuer le jeu entre aubes et carter
  - risque de contact !
- ❑ Revêtement abrasable sur le carter pour atténuer le contact
- ❑ Modification du comportement vibratoire des aubes en contact avec l'abrasable
- ❑ Phénomène observé : apparition de lobes d'usures pouvant entraîner une rupture des aubes par fatigue.

### ■ Objectif :

- ❑ Prendre en compte la **modification** du comportement vibratoire de l'aube en contact induite par les autres aubes non frottantes de la roue aubagée dans les modèles.
- ❑ Modèle de roue aubagée (Blisk) :
  - 1 aube en sur-longueur maillée finement
  - toutes les autres aubes maillées avec un **super-élément**



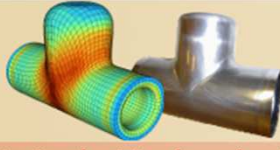
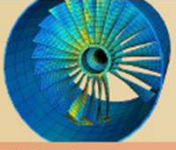
## Méthodes de réduction de modèle

- Système d'équations à résoudre :
$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}\mathbf{U} = \mathbf{F}$$
- Décomposition du vecteur des DDLs  $\mathbf{U}$  de taille  $n$  :
  - DDLs « Retenus »  $\mathbf{U}_R$  de taille  $n_R$
  - DDLs « Condensés »  $\mathbf{U}_C$  de taille  $n_C$avec  $n = n_R + n_C$

DDLs « Retenus » → seuls DDLs conservés dans le calcul final,  
→ connexion du super-élément avec le reste de la structure,  
→ application de CLs,  
→ visualisation du comportement,  
→ extraction directe de données en certains nœuds.

- Nouvelle décomposition du système :

$$\begin{pmatrix} \mathbf{M}_{RR} & \mathbf{M}_{RC} \\ \mathbf{M}_{CR} & \mathbf{M}_{CC} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{\mathbf{U}}_R \\ \ddot{\mathbf{U}}_C \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{K}_{RR} & \mathbf{K}_{RC} \\ \mathbf{K}_{CR} & \mathbf{K}_{CC} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{U}_R \\ \mathbf{U}_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{F}_R \\ \mathbf{0}_C \end{pmatrix}$$



## Super-élément de Guyan

### Condensation statique

- Hypothèse : Seuls les DDLs Retenus permettent de représenter le comportement dynamique de la structure.
- Changement de base  $U \rightarrow U_R$  :

$$\begin{pmatrix} U_R \\ U_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I \\ \Psi \end{pmatrix} U_R = \alpha U_R$$

où  $\Psi$  est une matrice de taille  $[n_C \times n_R]$  des **modes statiques de liaison**.

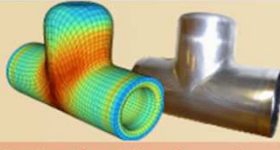
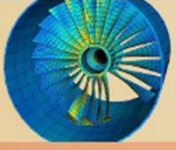
- Système réduit ( $n_R$  DDLs) :

$$\widetilde{M} \ddot{U}_R + \widetilde{K} U_R = F_R$$

avec  $\widetilde{M} = \alpha^t M \alpha = M_{RR} + (M_{RC} \Psi)^t + M_{RC} \Psi + \Psi^t M_{CC} \Psi$

$$\widetilde{K} = \alpha^t K \alpha = K_{RR} + K_{RC} \Psi$$





## Super-élément de Craig-Bampton

### Condensation dynamique

- Changement de base  $U \rightarrow Q$  :

$$\begin{pmatrix} U_R \\ U_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \Psi & \Phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Q_R \\ Q_N \end{pmatrix} = \alpha Q$$

où  $\Psi$  est la matrice des **modes statiques de liaison** de taille  $[n_C \times n_R]$

$\Phi$  est la matrice des **modes propres à interfaces fixes** de taille  $[n_C \times n_N]$

$Q_R = U_R$  et  $Q_N$  = amplitudes associées aux modes propres

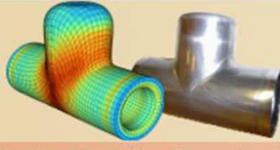
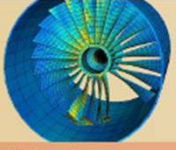
- **Système réduit** ( $n_R + n_N$  DDLs) :

$$\widetilde{\mathbf{M}}\ddot{\mathbf{Q}} + \widetilde{\mathbf{K}}\mathbf{Q} = \widetilde{\mathbf{F}}$$

$$\widetilde{\mathbf{M}} = \alpha^t \mathbf{M} \alpha = \begin{pmatrix} \widetilde{\mathbf{M}}_{RR} & \widetilde{\mathbf{M}}_{RN} \\ \widetilde{\mathbf{M}}_{NR} & \widetilde{\mathbf{M}}_{NN} \end{pmatrix} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} \widetilde{\mathbf{M}}_{RR} = \mathbf{M}_{RR} + (\mathbf{M}_{RC} \Psi)^t + \mathbf{M}_{RC} \Psi + \Psi^t \mathbf{M}_{CC} \Psi \\ \widetilde{\mathbf{M}}_{RN} = \widetilde{\mathbf{M}}_{NR}^t = \mathbf{M}_{RC} \Phi + \Psi^t \mathbf{M}_{CC} \Phi \\ \widetilde{\mathbf{M}}_{NN} = \Phi^t \mathbf{M}_{CC} \Phi \end{cases}$$

$$\widetilde{\mathbf{K}} = \alpha^t \mathbf{K} \alpha = \begin{pmatrix} \widetilde{\mathbf{K}}_{RR} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \widetilde{\mathbf{K}}_{NN} \end{pmatrix} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} \widetilde{\mathbf{K}}_{RR} = \mathbf{K}_{RR} + \mathbf{K}_{RC} \Psi \\ \widetilde{\mathbf{K}}_{NN} = \Phi^t \mathbf{K}_{CC} \Phi \end{cases}$$

Notons que  $\widetilde{\mathbf{K}}_{NN} = \text{diag}(\omega_1^2, \omega_2^2, \dots, \omega_{n_N}^2)$  et  $\widetilde{\mathbf{M}}_{NN} = \mathbf{I}$  .



## Modes de déformations

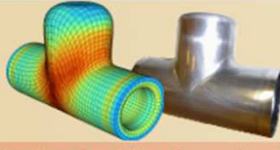
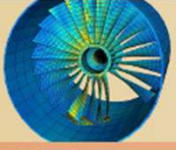
- Mode statique de liaison  $\Psi_j$  :
  - Déformée de la structure condensée
    - déplacement unitaire imposé en un DDL Retenu,
    - les autres DDLs Retenus = 0.

$$\mathbf{K}_{CC} \Psi_j = -\mathbf{K}_{CR} \mathbf{U}_R^j$$

$$(\mathbf{U}_R^j)_i = \delta_{ij} \text{ pour } i, j = 1, \dots, n_R$$

- Mode propre à interfaces fixes  $\Phi_j$  :
  - Modes propres de la structure lorsque **tous les DDLs Retenus = 0**
    - Nombre de modes propres =  $n_C$
    - **Modèle réduit** : conserver les  $n_N$  premiers modes tels que  $n_N \ll n_C$
    - Algorithme de Lanczos

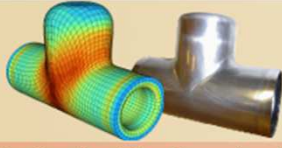
$$\mathbf{K}_{CC} \Phi_j = \omega_j^2 \mathbf{M}_{CC} \Phi_j$$



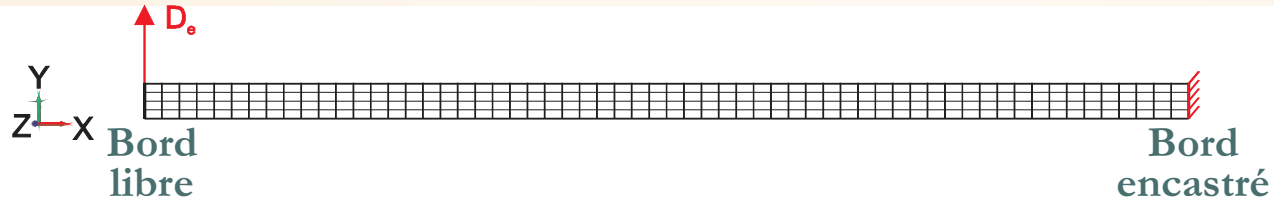
## Implémentation dans Metafor

- Implémentation du super-élément de **Guyan**
- Implémentation du super-élément de **Craig-Bampton**
  - Reprise des développements de P. Bussetta
  - Correction expression de  $\widetilde{\mathbf{M}}$  + extraction de données aux DDLs Condensés
  - Normalisation des modes propres par rapport à la masse  $\|x\| = \sqrt{x^t M x}$   
→ Conséquence  $\widetilde{\mathbf{K}}_{NN} = \text{diag}(\omega_1^2, \omega_2^2, \dots, \omega_{n_N}^2)$  et  $\widetilde{\mathbf{M}}_{NN} = I$
  - Efficacité des algorithmes de calcul des matrices réduites améliorée (boucles for)
  - Modification de la fonction `CSRMatrix::fill(Matrix &matrix)` afin de pouvoir utiliser le solver DSS pour l'analyse fréquentielle faite dans le super-élément CB.
- Divers
  - Ajout d'un test pour le calcul ou non de la contribution « Coriolis » dans K
  - Ajout d'un `tbb::task_scheduler_init init(1)` dans les super-éléments car calculs parallèles alors que `nbThread = 1` (pourquoi ?)
  - Ajout de timers `computeEigenFixedModes (CB)`, `computeSEmatrices`, `generateSE`.
  - Ajout de `fillExternalForces()` : calcul des forces centrifuges et de Coriolis appliquées au super-élément (déformation centrifuge OK)



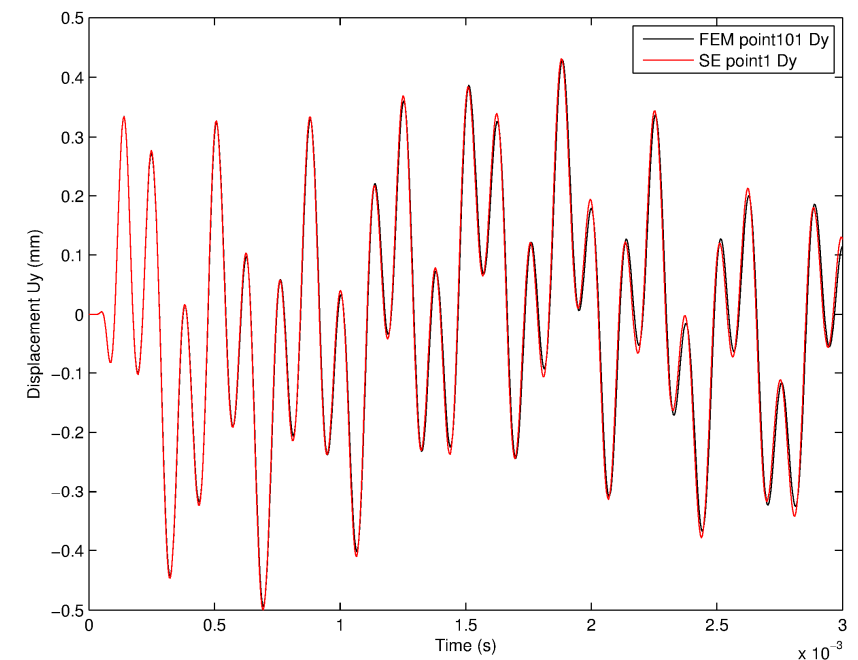
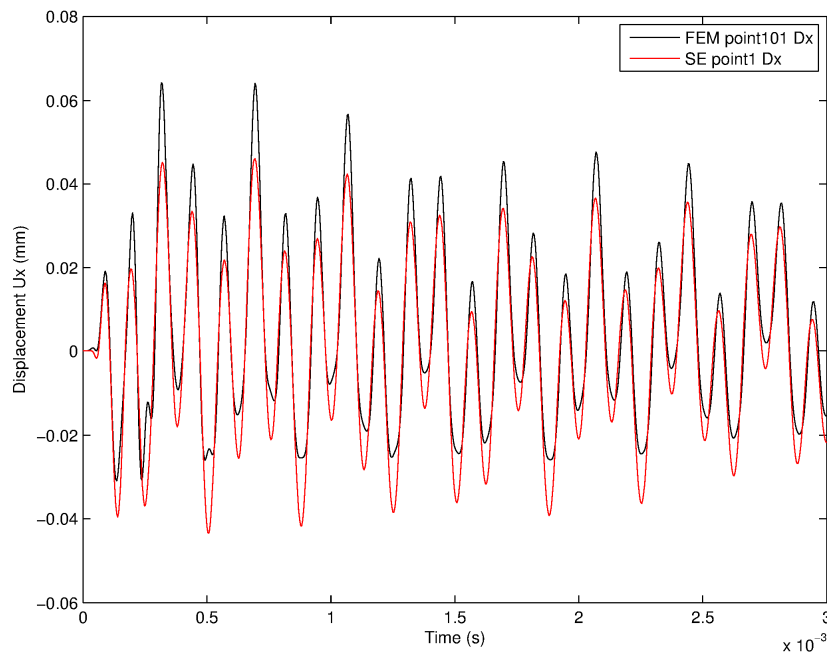
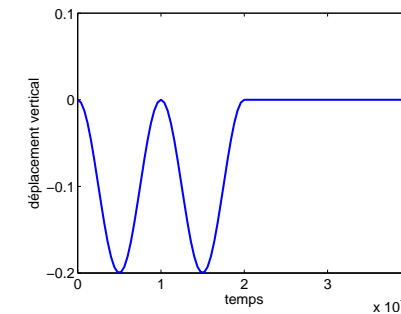


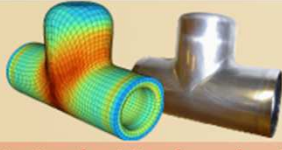
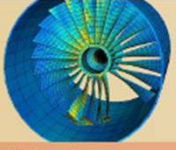
## Validation du super-élément de Craig-Bampton



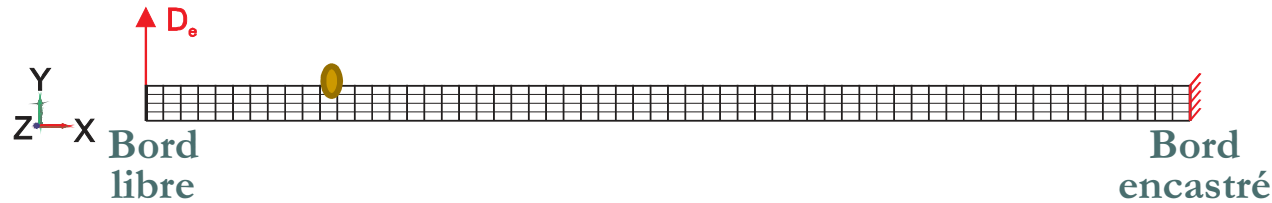
### ■ Calcul des vibrations libres :

- Maillage 2D : 40 x 6
- Eléments : EAS
- Pas de temps :  $4 \times 10^{-6}$  s
- Nb de modes propres : 10

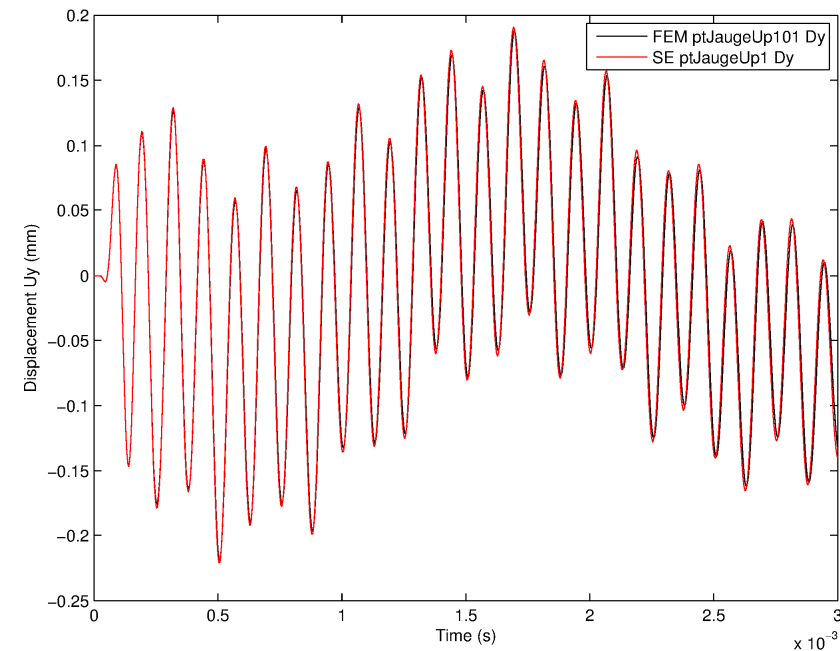
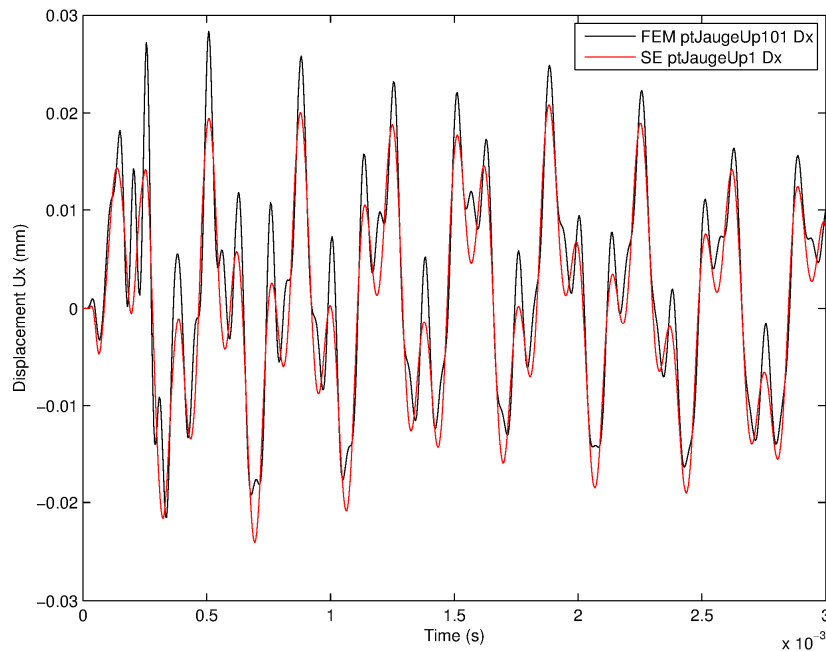




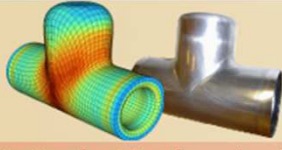
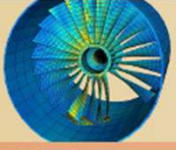
## Validation du super-élément de Craig-Bampton



### ■ Mesures cinématiques sur point de jauge (condensé)

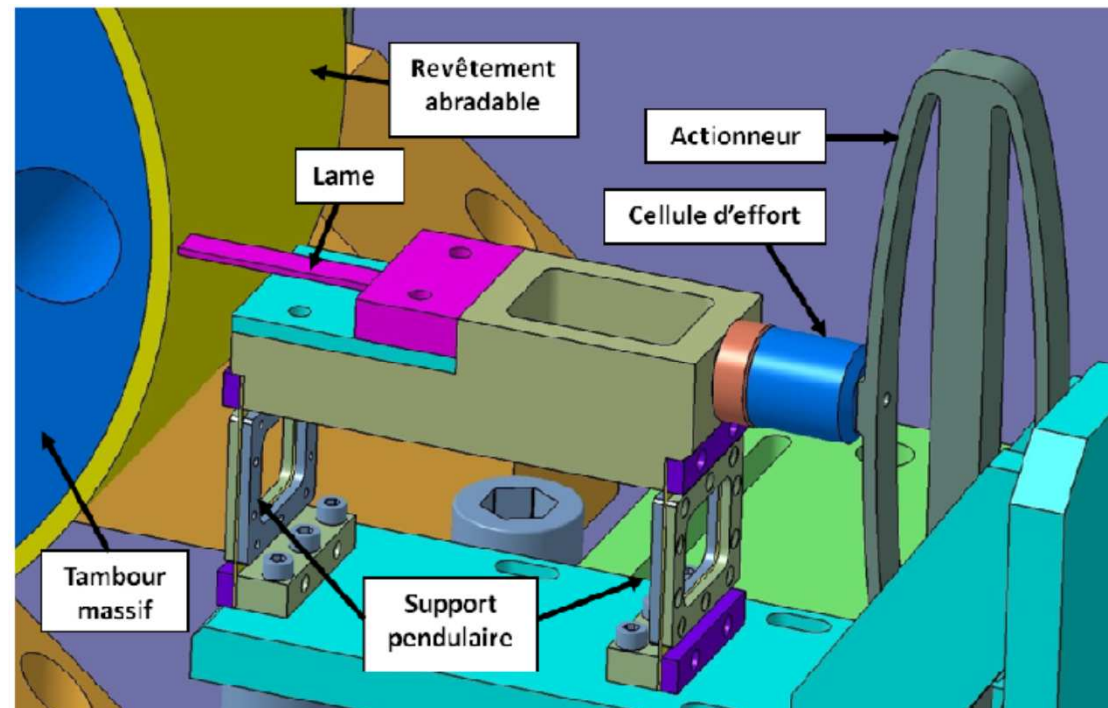


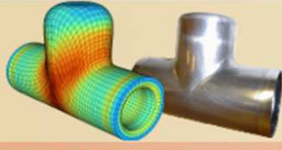
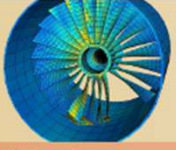
- Déplacement vertical bien représenté
- Déplacement horizontal surestimé
- Analyse fréquentielle du super-élément OK  
→ configuration Libre/Libre et Encastrée/Libre



## Application au modèle banc Onera

- Banc Onera
  - Caractérisation de l'interaction lame/abradable
  - Tambour revêtu d'un matériau abradable
  - Lame instrumentée (cellule d'effort, jauge de déformation) : flexion de la lame, force de contact en son extrémité, déformations subies.





## Application au modèle banc Onera

- Essai n°1 :
  - Maillage 3D : 240 x 16 x 4
  - Pénalité normale (contact) :  $P_N = 400$
  - Coefficient de frottement :  $\mu = 0,35$
  - Pas de temps :  $1 \times 10^{-5} \text{s}$
  - Nb de modes propres : 10

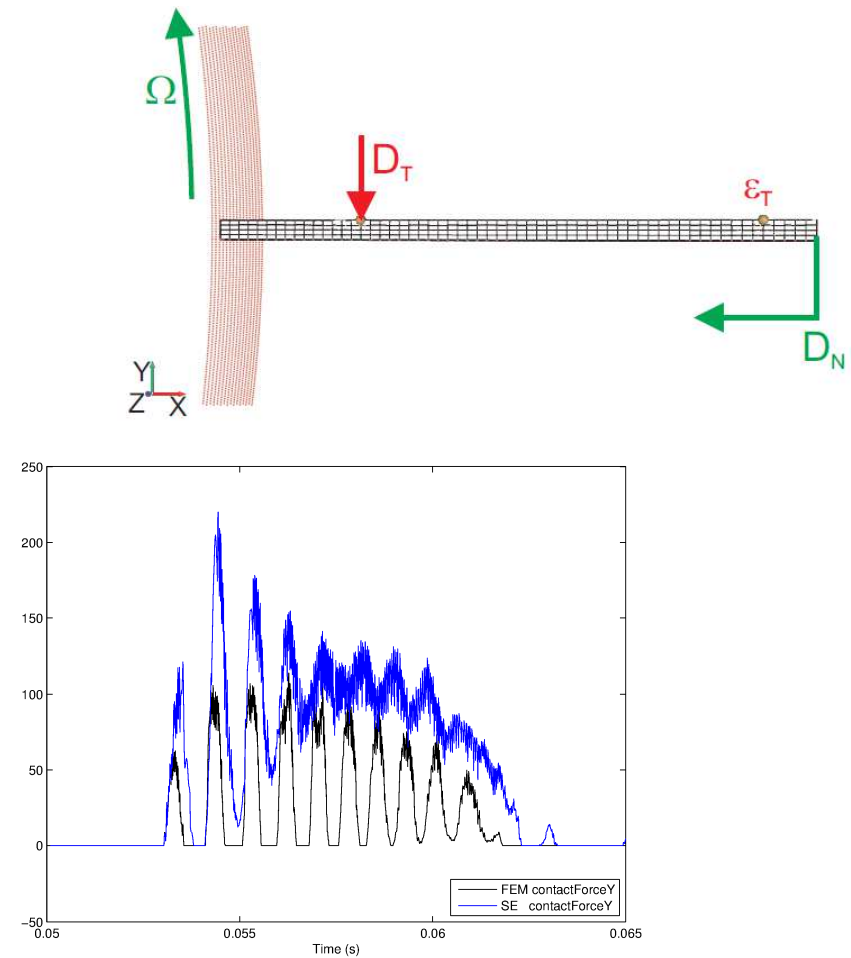
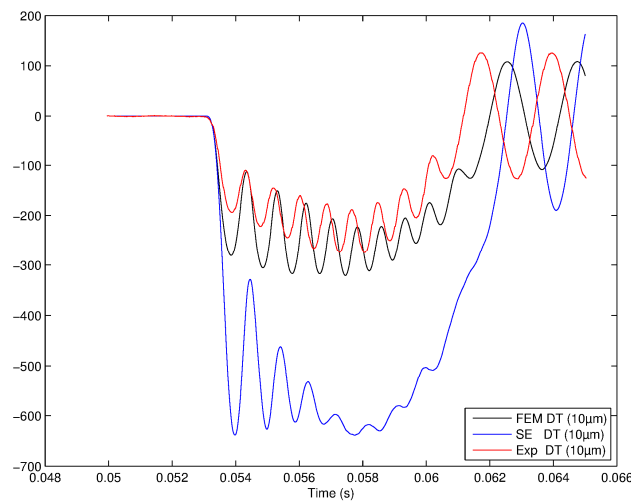
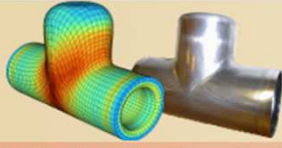


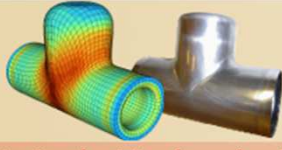
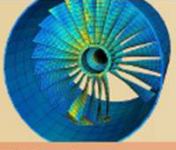
Figure : Comparaison Exp / FEM / SE Craig-Bampton,  $D_T$  (à gauche) et force de contact (à droite).

- Gestion du **contact** avec le super-élément : à vérifier...



## Application au modèle banc 18ER (pied)

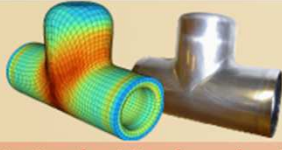
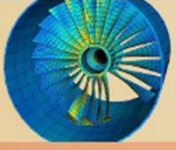
- Banc 18ER :
  - ❑ Banc représentatif des compresseurs basse pression
  - ❑ Roue mobile n°4 composée de 62 aubes dont 1 en sur-longueur
  - ❑ Interaction aube / carter revêtu d'un matériau abrasable
- Modèle Metafor du banc 18ER
  - ❑ Objectif : générer la divergence de l'aube + le mode d'usure à 6 lobes (vitesse donnée, régime stabilisé)
  - ❑ Maillages :
    - 4 géométries d'aube : maillage grossier (sans pied), de référence, fin.
    - Modification des fichiers BACON :
      - ❑ Création de 2 groupes d'éléments `footElements`, `bladeElements` (opérations BACON à partir des groupes de noeuds existants)
      - ❑ Création d'un groupe de noeuds `intersectionFootBlade`
    - Réduction du nb de fichiers maillage (à faire)



## Application au modèle banc 18ER (pied)

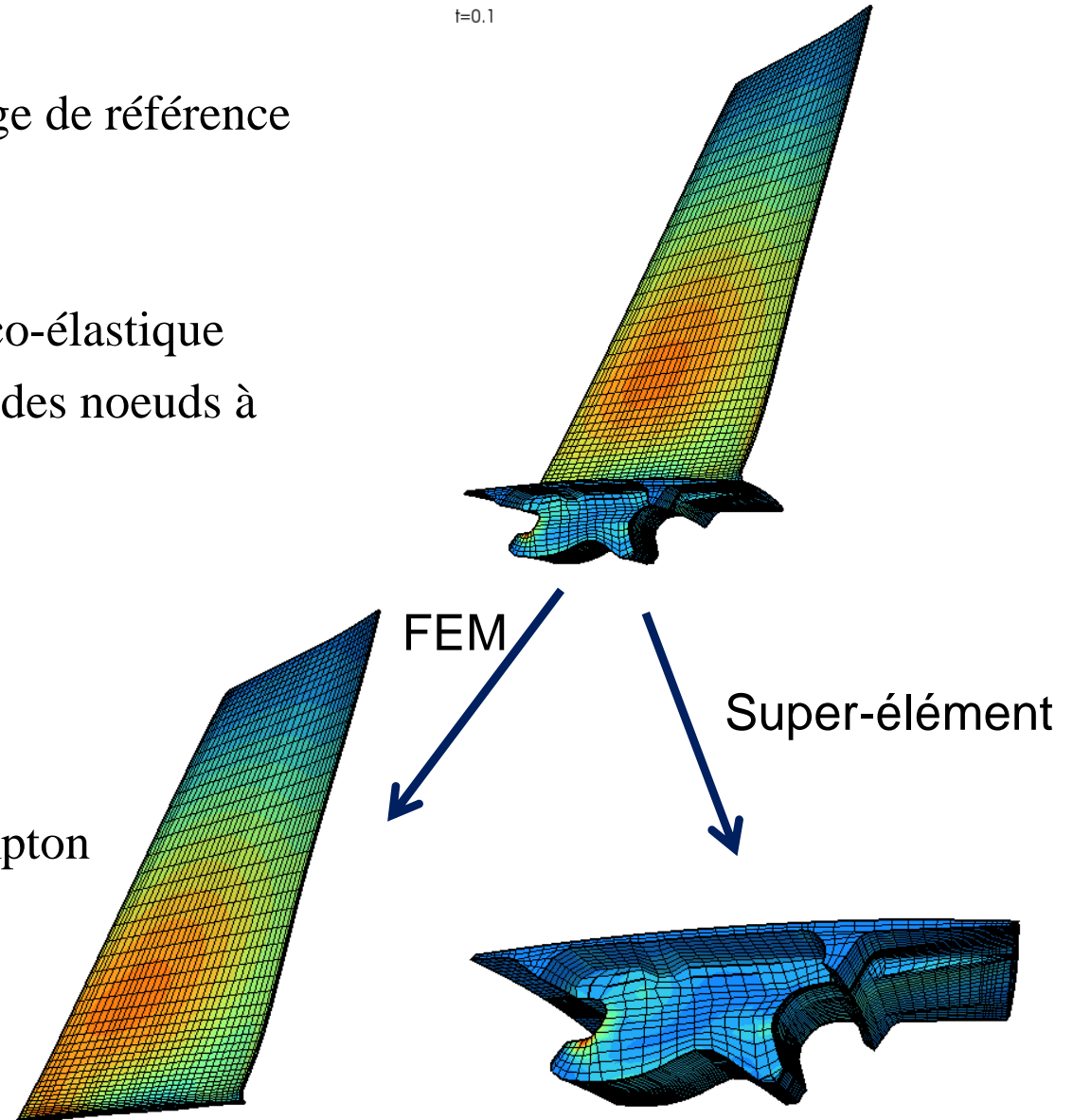
- Modèle Metafor du banc 18ER : étapes du calcul
  - Etape 1 : mise en rotation
    - Référentiel tournant attaché à l'aube
    - Calcul de la déformation et du raidissement induits par les forces centrifuges
  - Etape 2 : construction de la géométrie du carter
    - Construire le carter tel que le jeu aube/carter soit le même quelle que soit la vitesse étudiée (données expérimentales du banc18ER)
    - Prise en compte du déplacement de la tête d'aube (étape 1)
  - Etape 3 : calcul d'interaction
    - Simulation de l'interaction aube/abradable, schéma dynamique, référentiel tournant attaché à l'aube, ...

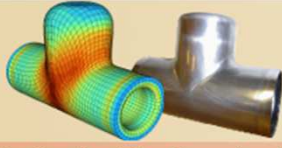




## Application au modèle banc 18ER (pied)

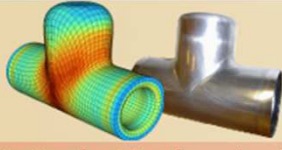
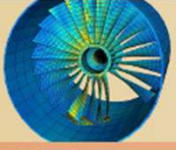
- Modèle Metafor Banc 18ER :
  - Géométrie de référence – Maillage de référence
  - Eléments EAS
  - Vitesse de rotation : 2600RPM
  - Matériau constituant l'aube : visco-élastique
  - Ajout d'extracteurs déplacement des noeuds à l'interface pied/pâle
- Simulations :
  - FEM
  - Pied condensé via SE Guyan
  - Pied condensé via SE Craig-Bampton





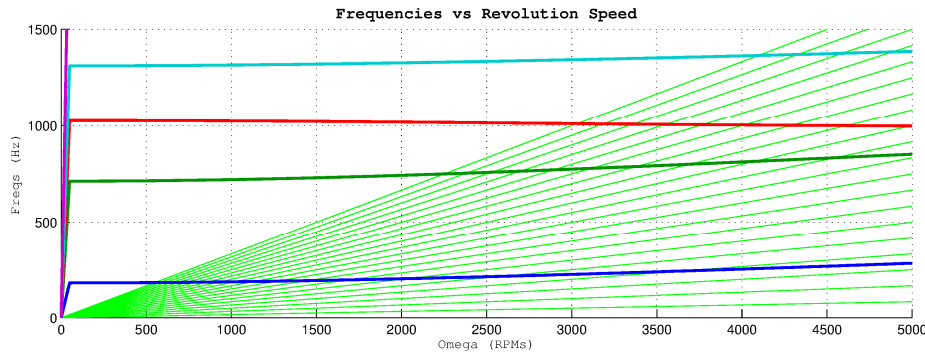
## Application au modèle banc 18ER (pied)

	FEM	Guyan	Craig-Bampton (5 modes retenus)
Nb Elements	13962	1 + 3060	1 + 3060
Nb Noeuds	18630	5100	5100
NbDofs	55890	15300	15305
Fréquences propres @ 2600RPM	215.6 Hz 760.7 Hz 1013.0 Hz 1336.0 Hz	215.6 Hz 761.0 Hz 1014.0 Hz 1337.0 Hz	215.6 Hz 760.8 Hz 1014.0 Hz 1336.0 Hz
Stp	13997	12964	13405
Ite	43116	39461	40243
Cpu (12 coeurs)	16h52m15.49s	4h22m30.66s	4h21m40.64s

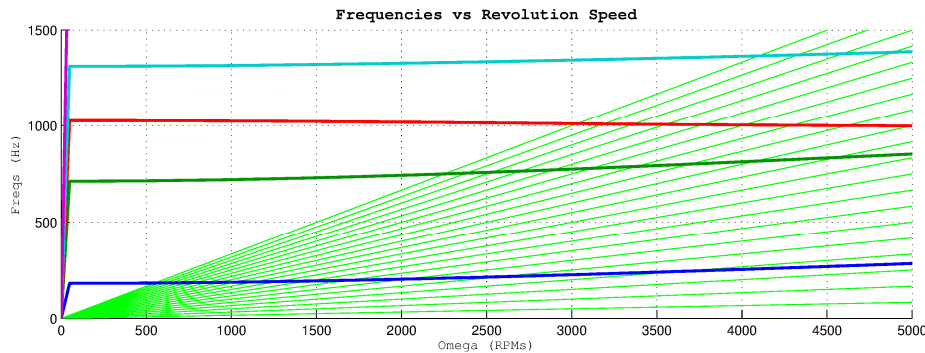
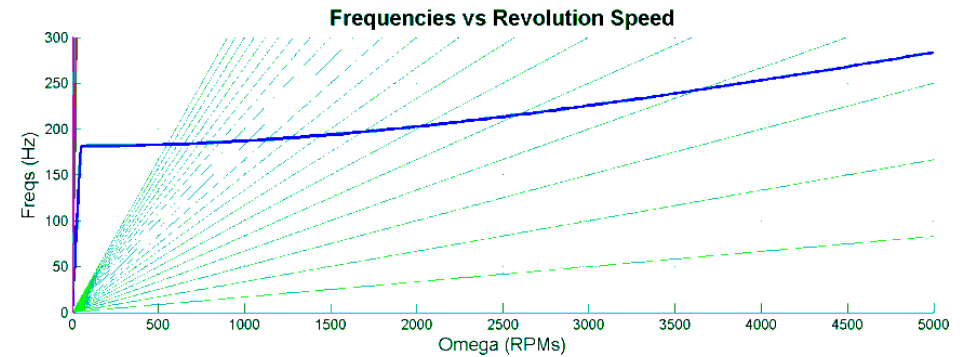


# Application au modèle banc 18ER (pied)

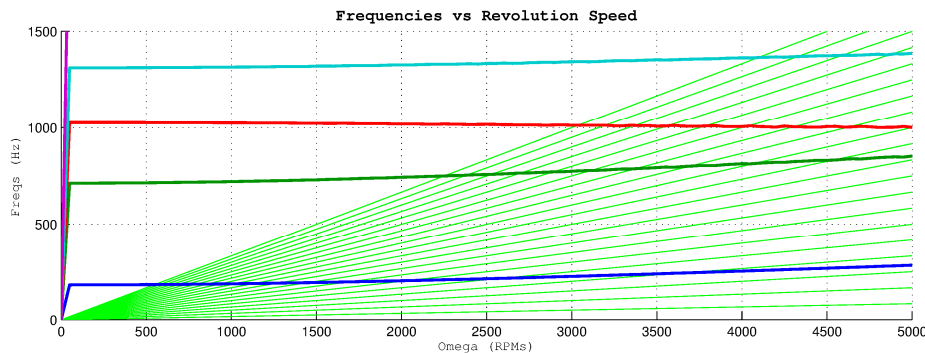
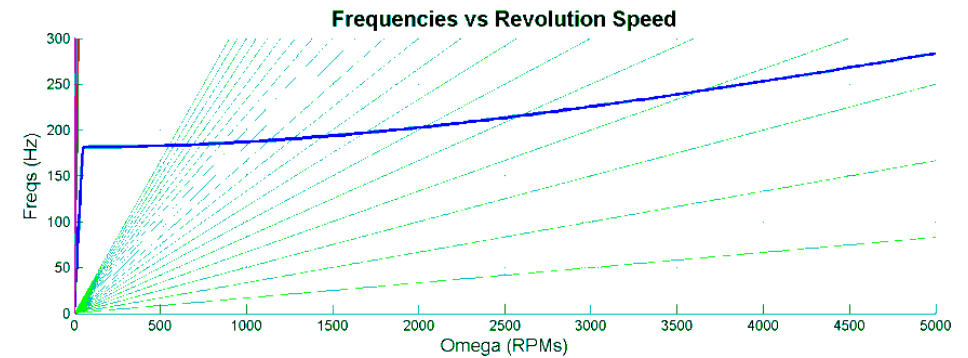
## Analyse fréquentielle – Raidissement centrifuge



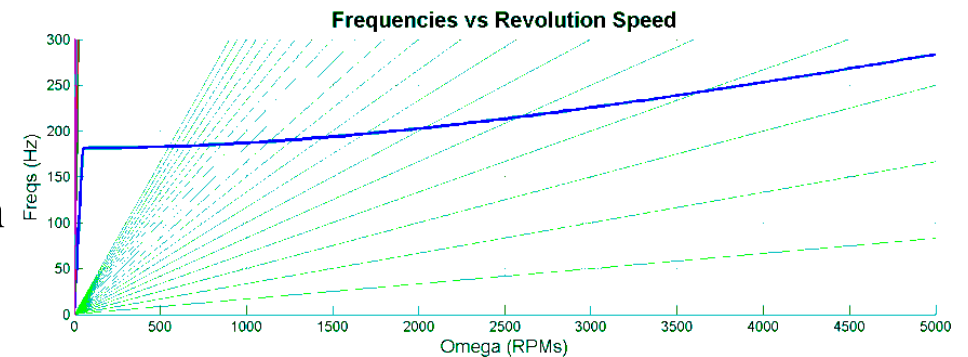
FEM

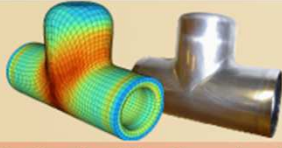


Guyan



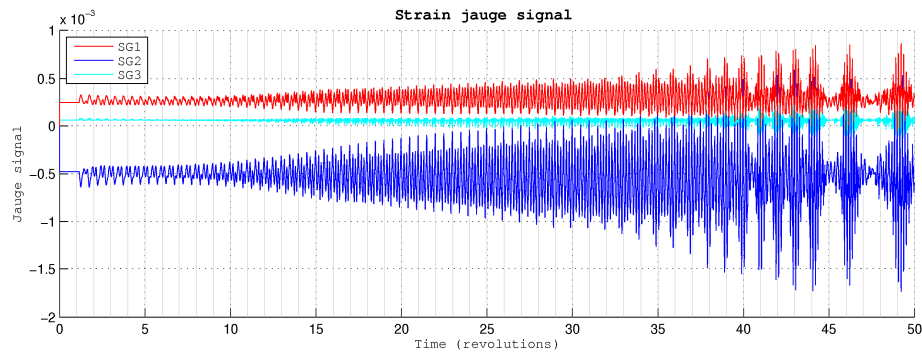
Craig-  
Bampton



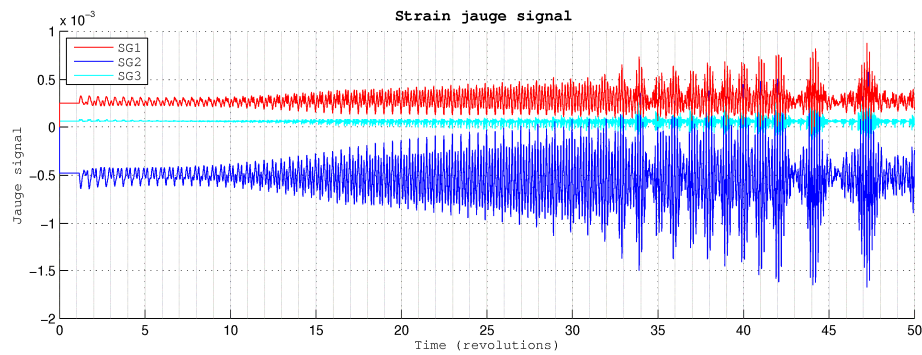
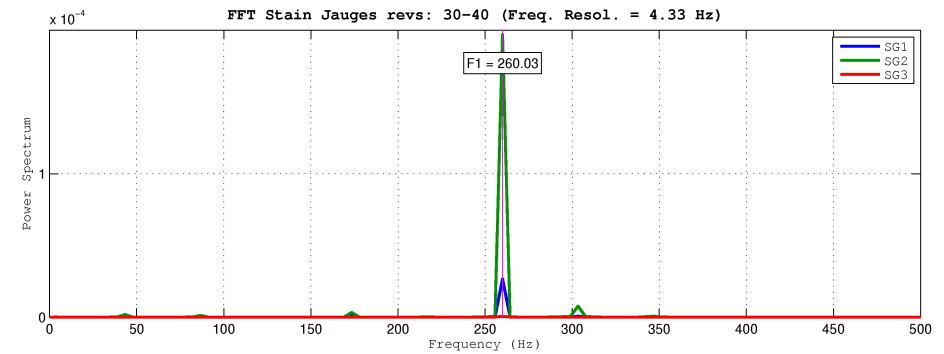


# Application au modèle banc 18ER (pied)

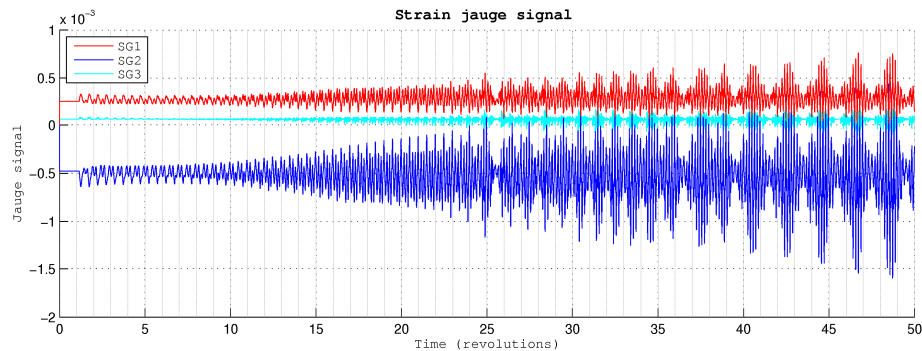
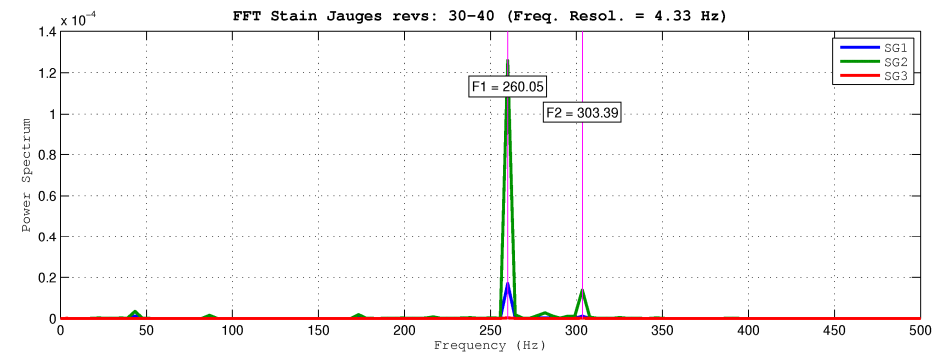
## Analyse des signaux de jauge



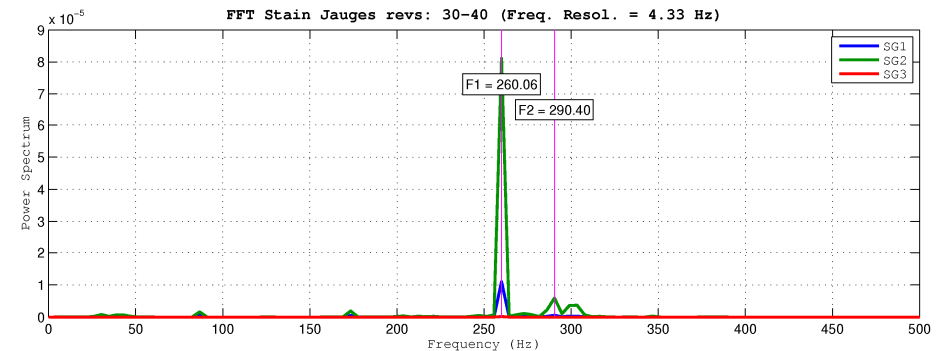
FEM



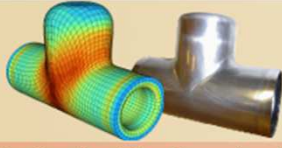
Guyan



Craig-  
Bampton



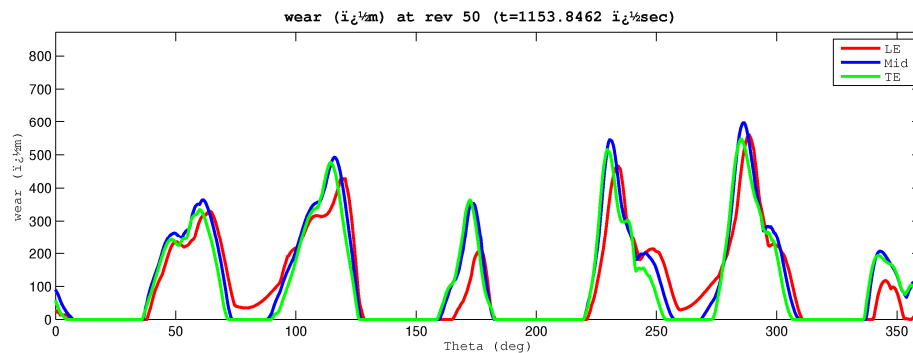
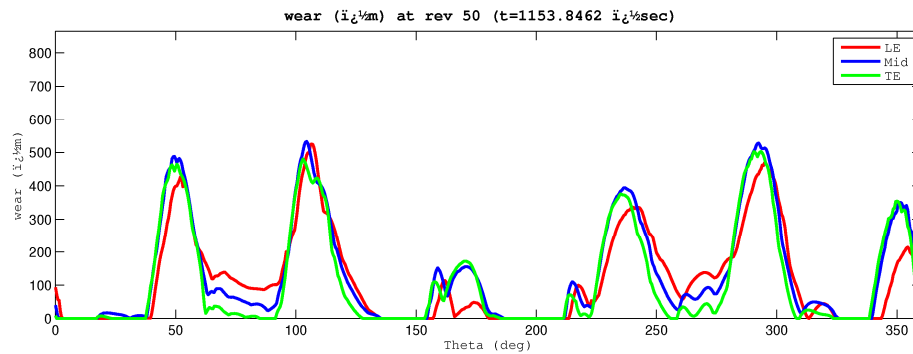
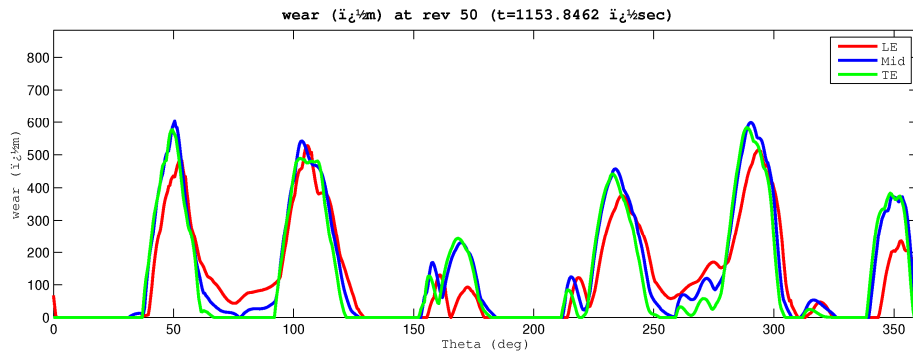




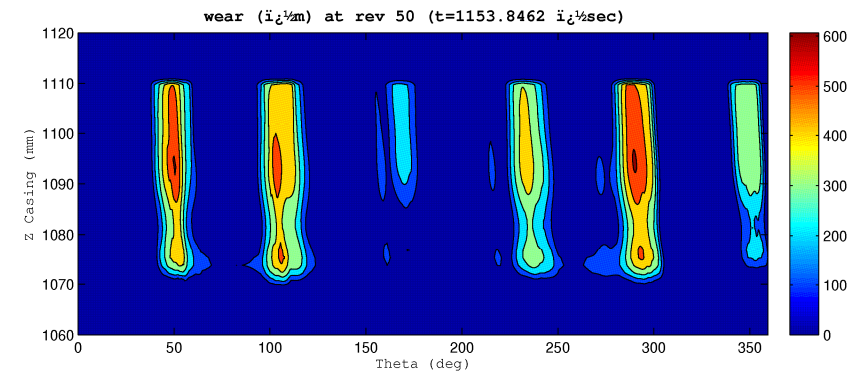
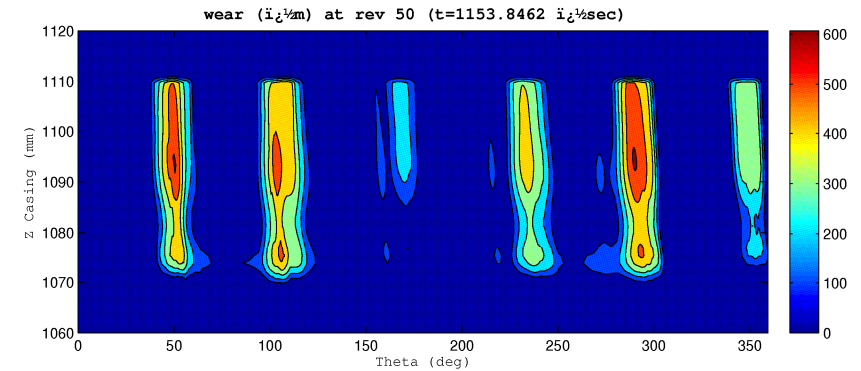
# Application au modèle banc 18ER (pied)

Usure du carter @ 50 tours

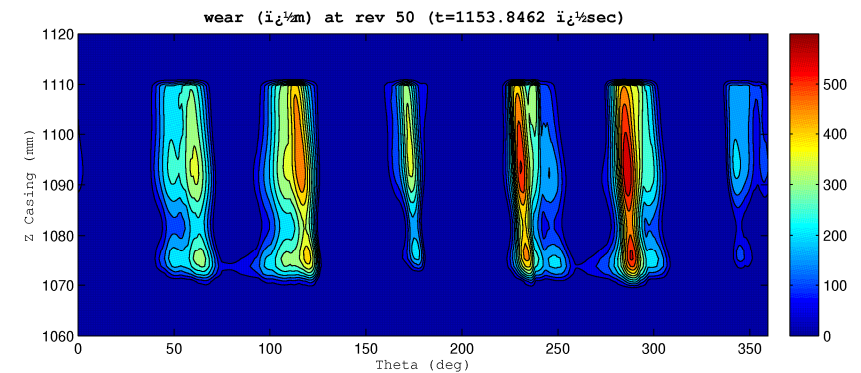
FEM

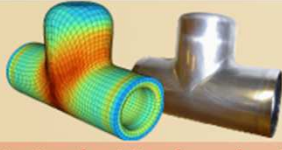
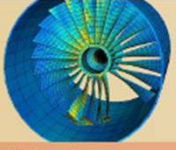


Guyan



Craig-Bampton

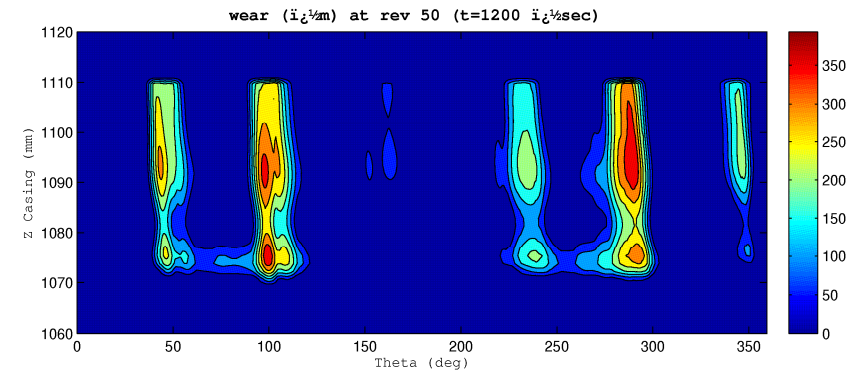
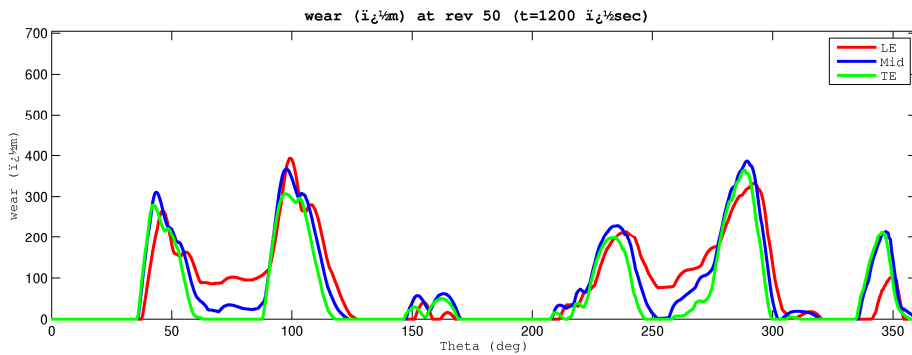




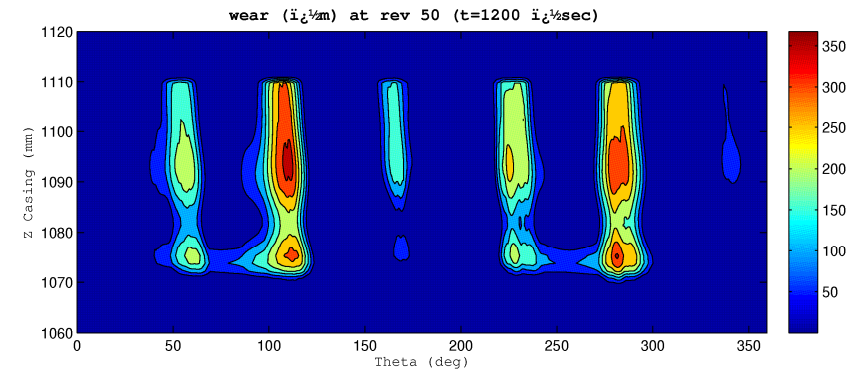
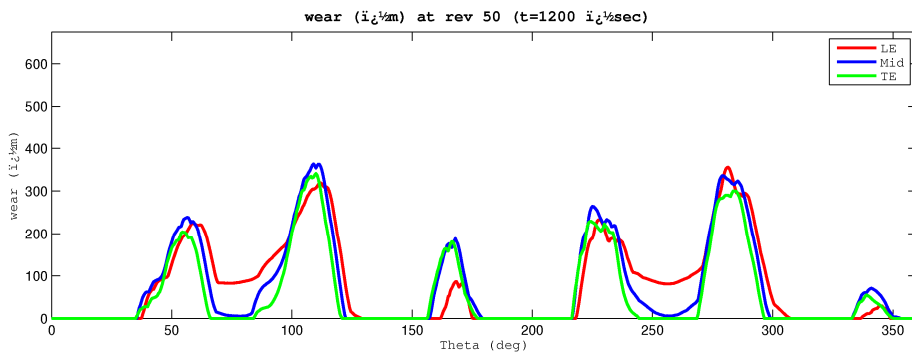
# Application au modèle banc 18ER (pied)

Usure à 50 tours - **2500 rpm**

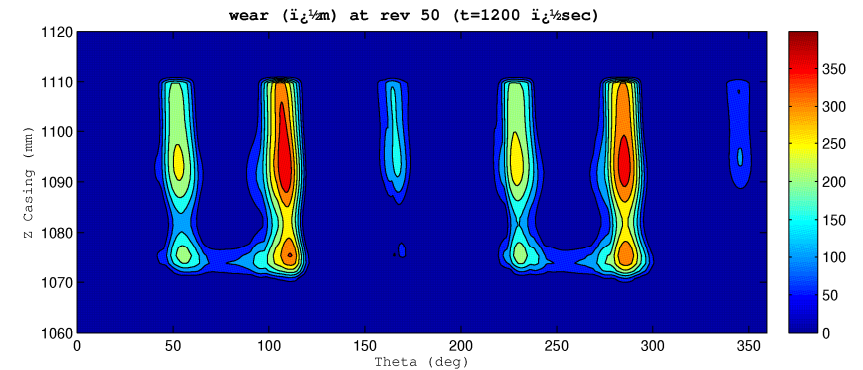
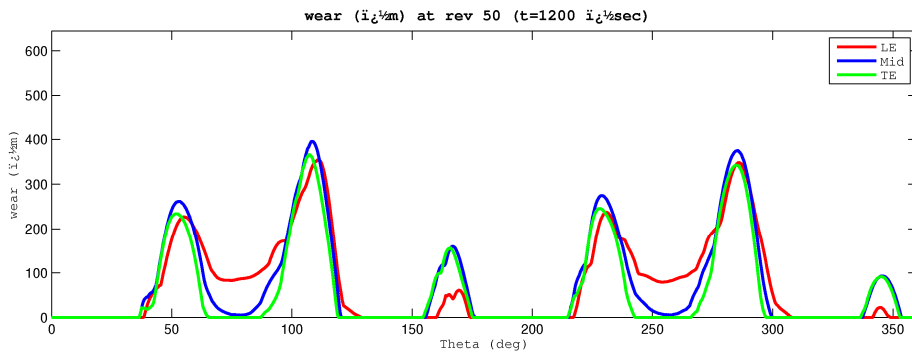
FEM



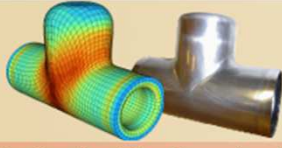
Guyan



Craig-  
Bampton



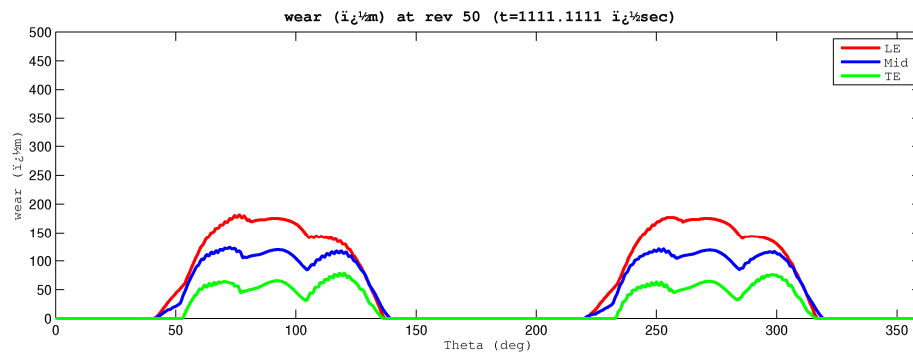
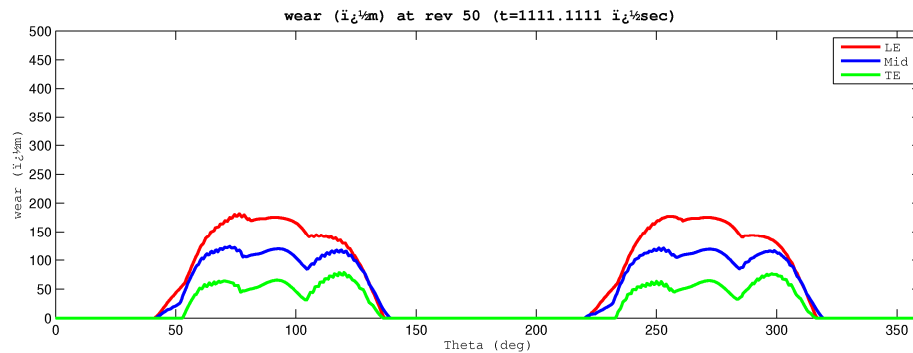
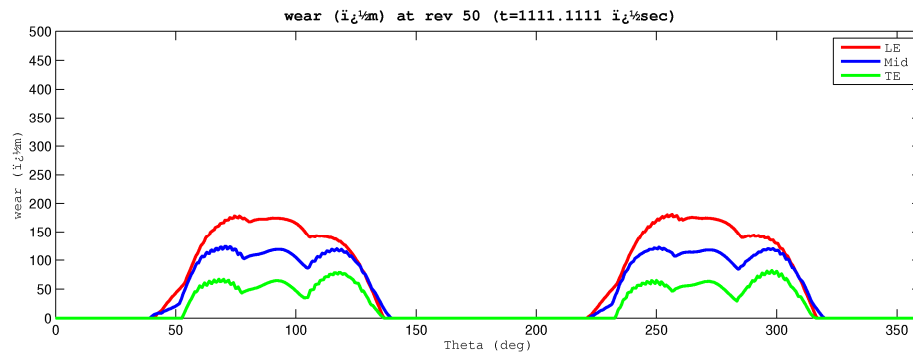




# Application au modèle banc 18ER (pied)

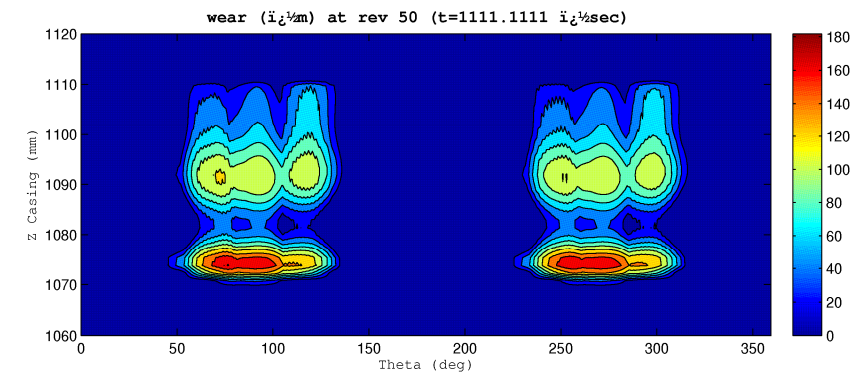
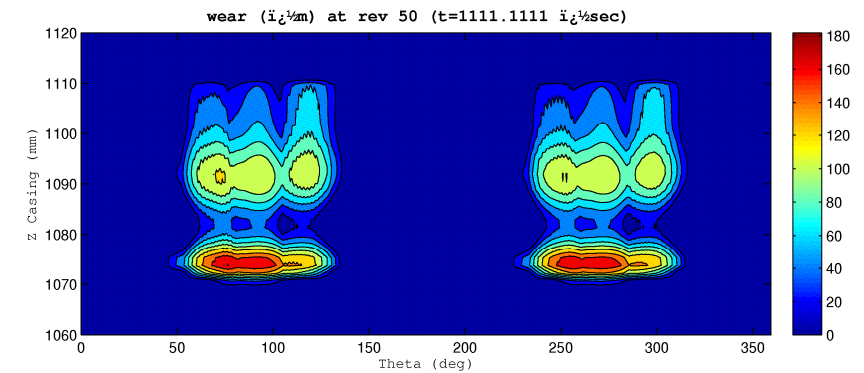
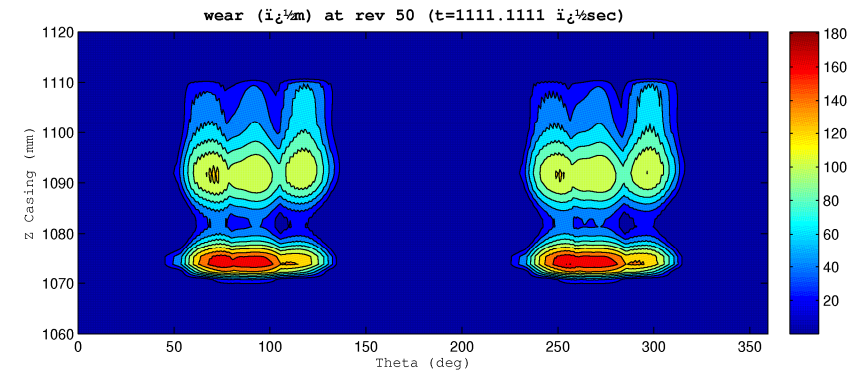
Usure à 50 tours - 2700 rpm

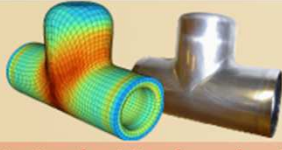
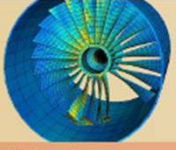
FEM



Guyan

Craig-Bampton

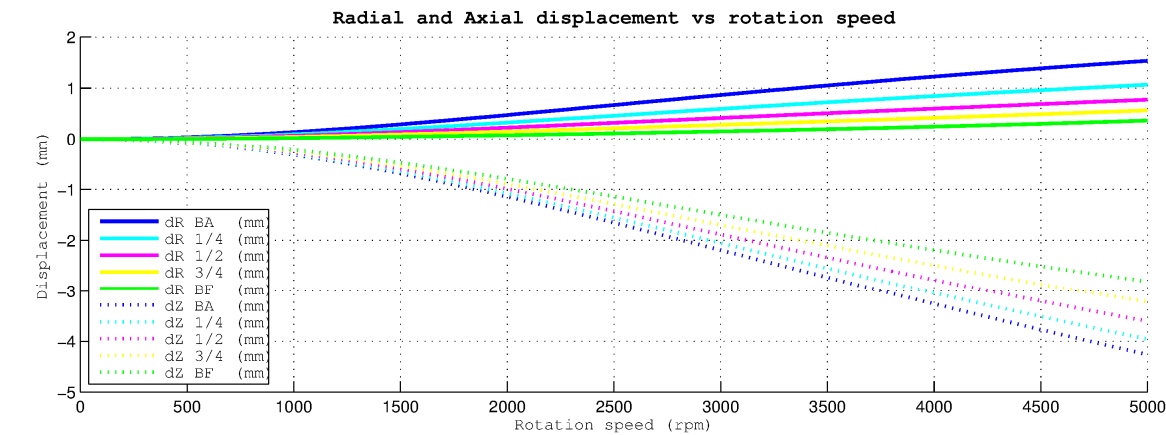




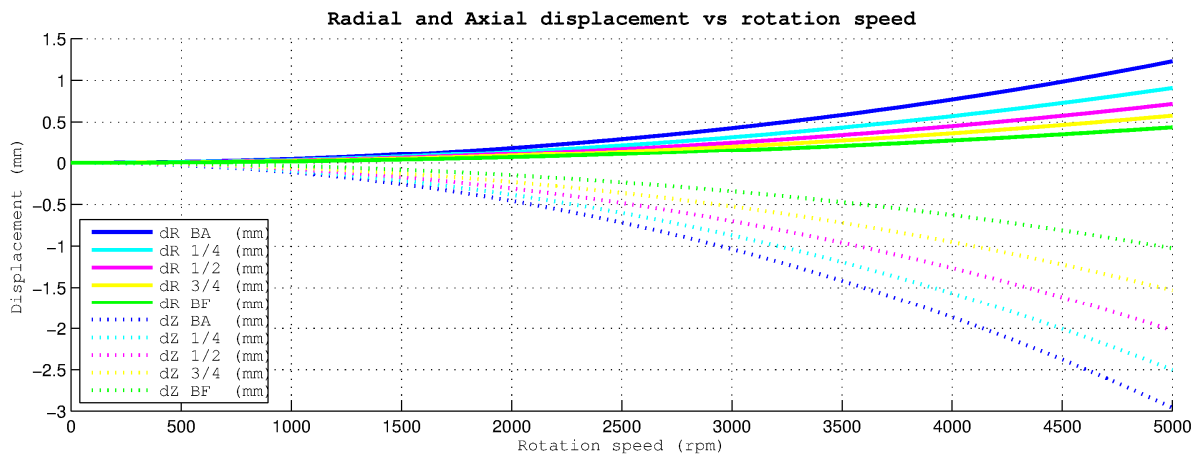
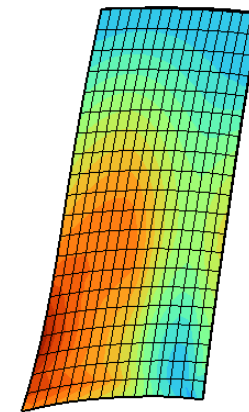
## Application au modèle banc 18ER (pâle)

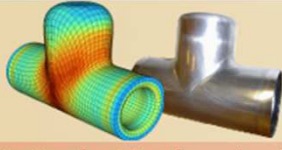
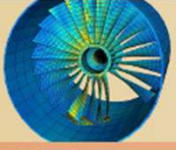
### ■ Déformation centrifuge :

- Aube de référence, maillage grossier (Haut FEM, Bas CBSE)



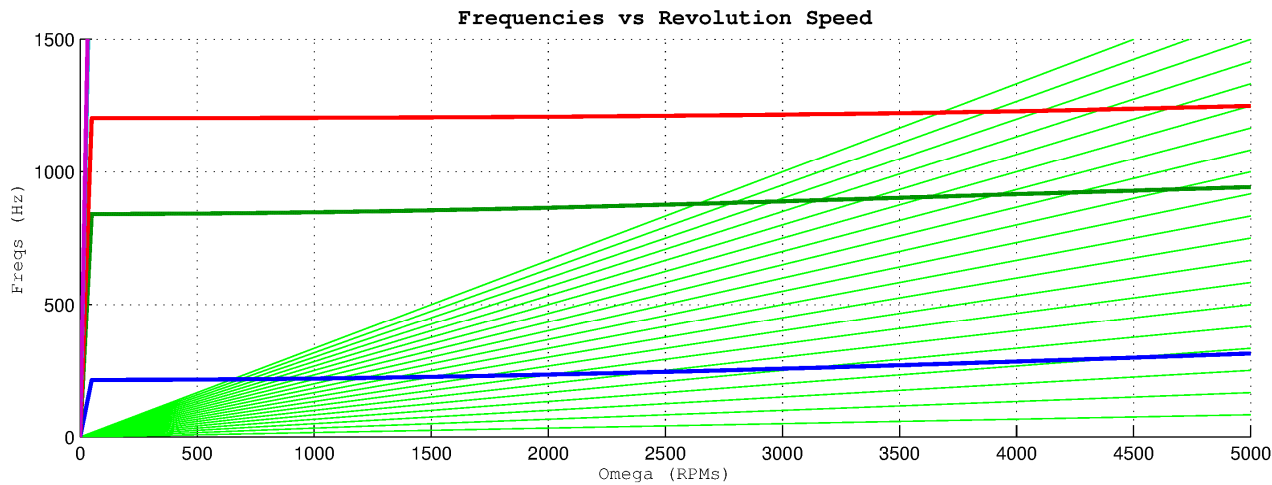
step 100  $t=1/1$   $dt=0.01$



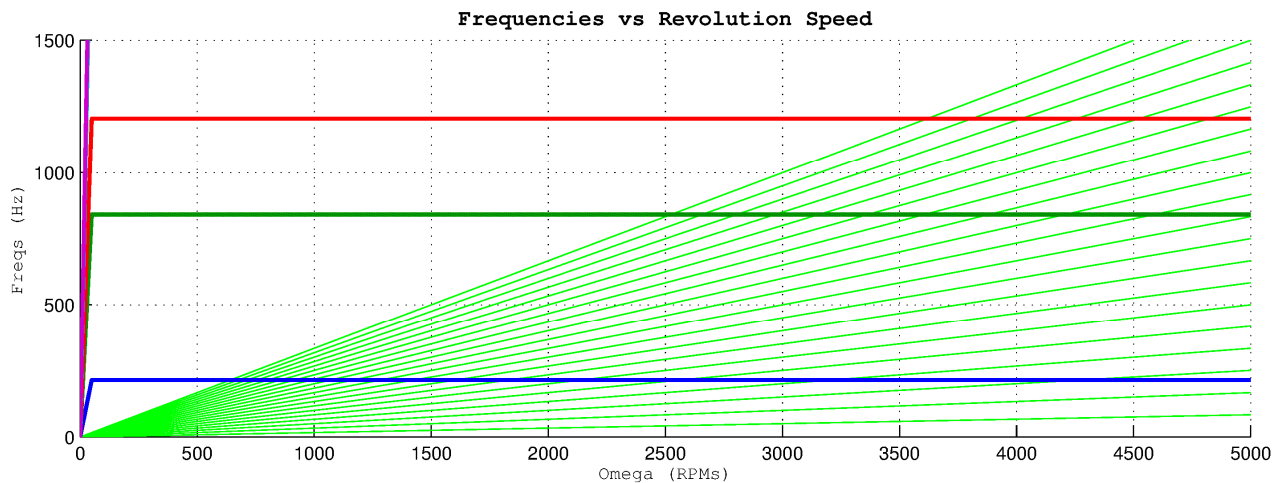
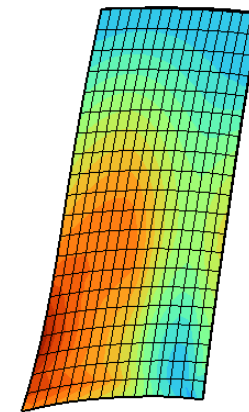


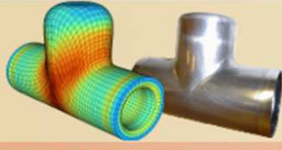
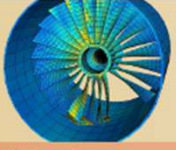
## Application au modèle banc 18ER (pâle)

- Raidissement centrifuge :
  - Aube de référence, maillage grossier (Haut FEM, Bas CBSE)



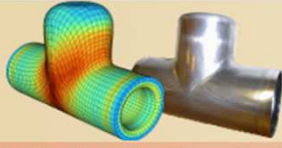
step 100  $t=1/1$   $dt=0.01$





## Conclusion et Perspectives

- Prise en compte du pied d'aube avec super-élément OK
- Déformation centrifuge OK
- Sauvegarde du super-élément → freqAnalysisFac comité par Luc  
→ adaptation au super-élément de Craig-Bampton
- Utilisation du super-élément à vitesse de rotation variable (cf. travaux de A. Batailly)
- Construction du super-élément à une vitesse donnée
- Raidissement centrifuge :
  - Calcul des modes propres à interfaces fixes à vitesse donnée ?
  - Comparaison avec FEM, différences car mise à l'équilibre du modèle FEM avant analyse fréquentielle.
  - Vitesse de rotation bien prise en compte dans la matrice de rigidité : peu d'influence.



## Conclusion et Perspectives

- Référentiel fixe, rotation du super-élément possible ?
- Si amortissement de Rayleigh dans le modèle, construction de C réduit en fonction K et M réduits possible ?
- Visualisation du super-élément ?
- Applications diverses :
  - Lame onera, partie actionneur qui génère l'excitation, partie bloc support + support pendulaire  
→ Améliorer la comparaison avec calculs/essais (force normale  $\neq$  force de contact)
  - Disque Blisk, parties hors-pâle.

